

サブクォーターミクロン半導体デバイスの宇宙線中性子ソフトエラー評価技術の開発

著者	矢作 保夫
号	3350
発行年	2004
URL	http://hdl.handle.net/10097/8622

氏 名	やはぎ やす お
授 与 学 位	矢 作 保 夫
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成 17 年 3 月 25 日
研究科, 専攻の名称	学位規則第 4 条第 1 項
学 位 論 文 題 目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 量子エネルギー工学専攻
指 導 教 員	サブクォーターミクロン半導体デバイスの
論 文 審 査 委 員	宇宙線中性子ソフトエラー評価技術の開発
	東北大学教授 馬場 護
	主査 東北大学教授 馬場 護 東北大学教授 笹尾 眞實子
	東北大学教授 内田 俊介 東北大学教授 小柳 光正
	東北大学名誉教授 中村 尚司

論 文 内 容 要 旨

1. 序論

宇宙線中性子に起因する半導体デバイスのソフトエラー現象が、半導体デバイスの微細化・高集積化に伴い、地上において顕在化してきた。デバイス特性維持から要請される駆動電圧の低下が、データ保持電荷量の低下につながっていることが主因である。ソフトエラーは電子データの意図せぬ変換やハイエンドサーバーの突然のハングアップ、医療機器の誤動作などにつながり、今後の高度情報化社会基盤に要求される高い信頼性を脅かす事柄であり、早急な対策を要する。しかし、現状では、デバイスのソフトエラー耐性向上に不可欠な宇宙線中性子ソフトエラーの現象に関する知識の集積が乏しく、またソフトエラーの評価手法も確立されておらず、対策が半導体デバイスの開発スピードに遅れをとっている。本研究では、宇宙線中性子起因のソフトエラーの客観的かつ定量的な評価手法の開発を目的として、

- (1) 加速器単色中性子を用いたソフトエラー試験と系統的解析に基づくソフトエラー発生確率のエネルギー依存性の把握
- (2) デバイスの微細化・高集積化に対応した 15MeV 以下の単色中性子によるソフトエラー評価手法の具体化
- (3) 連続スペクトル中性子を用いた単色中性子による試験法の検証
- (4) 連続中性子試験によるソフトエラー発生確率のエネルギー依存性導出
- (5) 実環境におけるソフトエラー測定と加速器中性子による試験との相関関係の明確化を実施した。

2. 単色スペクトル中性子によるデバイスの照射試験と解析

中性子ソフトエラー現象の系統的把握のため、東北大 FNL、同 CYRIC、大阪大 RCNP 及び Uppsala 大 TSL の加速器で発生させた単色及び準単色エネルギー中性子ビームを利用し、0.13~0.25 μ m プロセスの 10 デバイスについて 1~392 MeV のエネルギー領域におけるソフトエラー発生確率、すなわち SEU (Single Event Upset) 断面積のエネルギー依存性を求めた。これを SEU 関数と呼ぶ。1~15MeV の領域は単色スペクトルであり、1~2MeV は T(p,n) 反応、5MeV は D(d,n) 反応、15MeV は T(d,n) 反応を中性子生成反応として用いている。それ以上のエネルギー領域では ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応を用い

ており、準単色スペクトルである。準単色中性子の場合、ピーク部より低エネルギーの中性子（Tail 部分）のソフトエラーへの寄与は、別途 Monte Carlo ソフトエラー・シミュレータ CORIMS を用いて補正した。今回の広範なエネルギー範囲の系統的測定結果に基づき、Weibull 型関数

$$\sigma(E) = \sigma_{\infty} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{E - E_{th}}{W} \right)^S \right\} \right] \quad (1)$$

但し、 $\sigma_{\infty}(\text{cm}^2)$ は SEU 断面積の飽和値、 $E_{th}(\text{MeV})$ は SEU の閾値、 $W(\text{MeV})$ と S は Weibull パラメータが 15MeV 以下の低エネルギー領域まで含めて最もフィッティングが良いことを明らかにした(図 1)。特に 10MeV 以下の単色中性子を用いたソフトエラーの実測は本研究が初めてである。

また、低エネルギー中性子起因のソフトエラー測定は上記のように SEU 関数の決定に重要な役割を果たすと同時に、ソフトエラー発生の閾エネルギー E_{th} の測定と密接に関連している。従来、SEU 閾値 E_{th} は $^{28}\text{Si}(n, \alpha) ^{25}\text{Mg}$ 反応に起因して 5 MeV 程度とされてきた。しかし、今回の測定により 2 つの低電力 SRAM に関しては $E_{th} \leq 1\text{MeV}$ であり、5MeV よりも低いことが本研究の実測により初めて明らかになった。同位体も含めて核データとデバイス構造・材料を検討し、LET の関係から層間絶縁膜の SiO_2 の酸素や Si_3N_4 の窒素など軽元素の核反応に起因する可能性が高いことが分かった(図 2)。従来 Si しか考慮していなかったが、上記結果は今後のデバイスの微細化・高集積化において構造、材料、プロセスに対する課題提起となる。

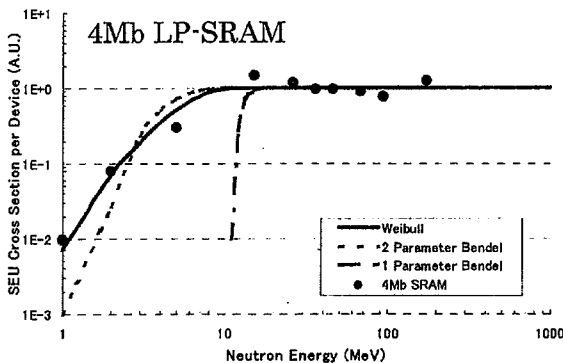


図 1 SEU 断面積の関数フィッティング

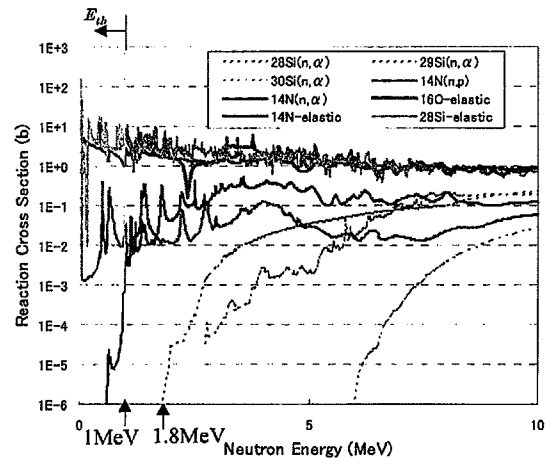


図 2 低エネルギー領域の核反応断面積

3. 連続スペクトル中性子によるデバイスの照射試験と解析

単色中性子ビームによる試験と連続中性子ビームによる試験との対応を明らかにするため、LANSCE(Los Alamos Neutron Science Center)において連続中性子ビームによる試験を実施した。連続中性子ビームは 800 MeV に加速された陽子をタングステンターゲットに入射させて得られる。まず、第 2 章で示した単色中性子による試験方法、すなわち SEU 関数の Weibull 型関数表現を基礎とする方法を検証するため、LANSCE の連続中性子スペクトル中で実測し、それと単色中性子試験で求めた Weibull 型関数を LANSCE のスペクトルで Folding した値と比較を行った。その結果、両者が比較的良く一致し、シミュレータ CORIMS を用いた Tail 補正方法を含め、単色中性子による試験の妥当性を連続中性子試験により検証できた(図 3)。

次に、LANSCE の連続中性子スペクトル形状をポリエチレンフィルターにより変形させ、各スベ

クトルに対するソフトエラーの実測値を求め、その結果から逆に半導体デバイスの Weibull 型の SEU 関数を導出する Unfolding 法を提案した。連続中性子による試験とは独立に得られた単色中性子ビームの結果が、Unfolding により導出した SEU 関数とよく一致し、Unfolding 法の有効性が検証できた (図 4)。

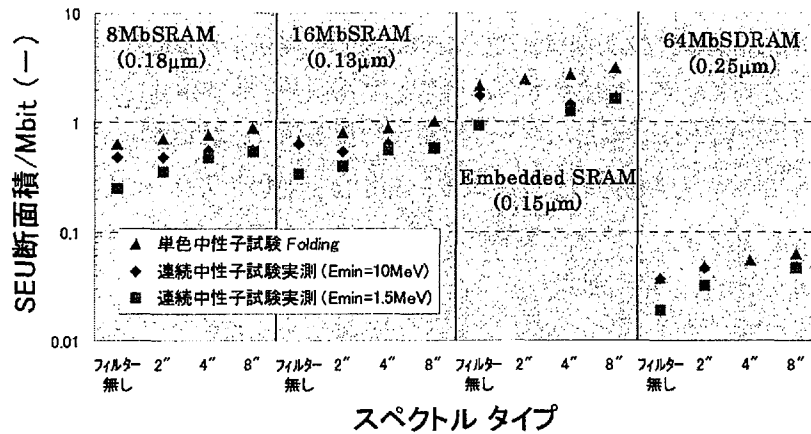


図 3 単色中性子試験結果の Folding による連続中性子試験の予測と実測の比較

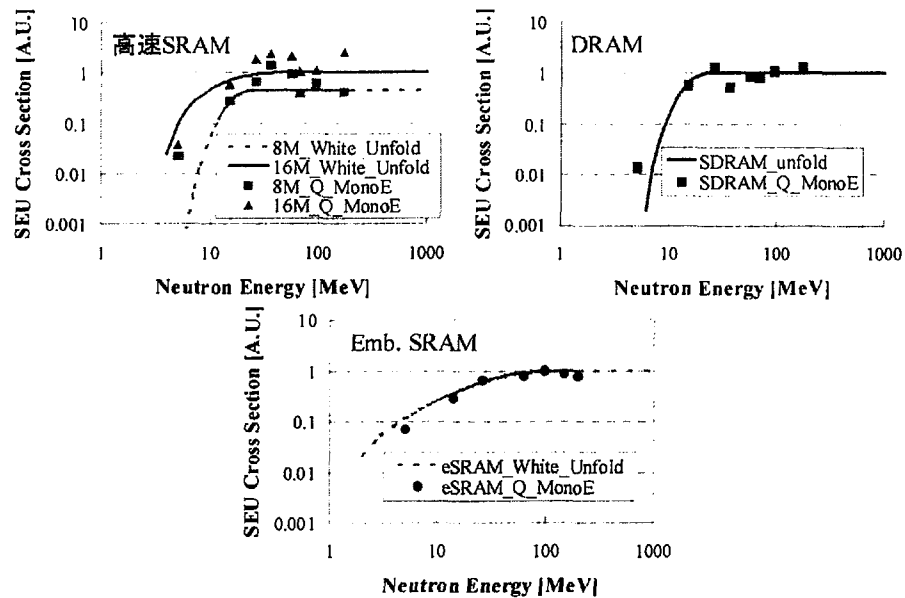


図 4 Unfolding により導出した Weibull 関数と単色中性子試験で求めた結果の比較

4. 加速器試験による実環境におけるソフトエラー率の予測

以上の加速器による試験から実環境におけるソフトエラー率 (SER : Soft Error Rate) を予測する手法と Monte Carlo シミュレータ CORIMS を統合したソフトエラー評価システム SECIS を提案した (図 5)。実環境試験地の地磁気緯度・経度及び標高に応じて宇宙線中性子のフラックスが変化するため、加速器試験結果に基づく SER 予測にはフラックスの補正が必要である。加速器試験から求めた Weibull 型 SEU 関数を、フラックス補正後の宇宙線中性子スペクトルで Folding して求めた SER

と、実環境試験実測値は 35%以内で一致した。さらに CORIMS による SER シミュレーション値と実環境試験実測値とは 20%以内で一致した (図 6)。これにより SECIS の有効性を確認するとともに、加速器試験により実環境での SER 予測が比較的高い精度で実施可能であることを明らかにした。

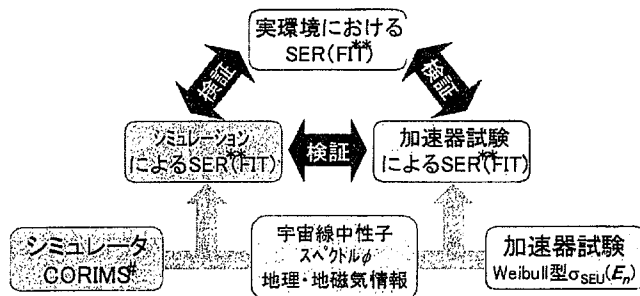


図5 ソフトエラー評価システム SECIS

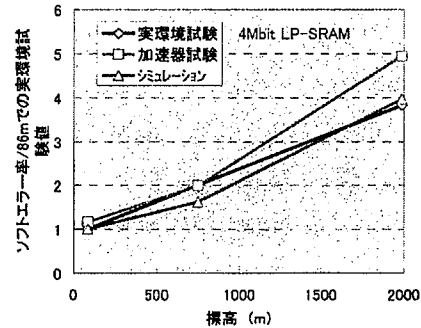


図6 SECIS による評価結果

5. 結論

- (1) 単色および準単色中性子を用いた系統的な実験により、
 - a) SEU 関数が Weibull 型関数でよく表現できること、
 - b) SEU 閾エネルギーが従来の推測値 5 MeV よりも低く、1 MeV 以下であり、これには酸素、窒素など軽元素の核反応が関与する可能性が高いこと、
 を示した。
- (2) 連続中性子試験を実施し、SEU 断面積実験値と、単色中性子試験により得られた Weibull 型の SEU 関数から計算した連続中性子環境下の SEU 断面積値が一致することから、単色中性子による評価手法を検証した。
- (3) 連続中性子スペクトルをフィルターで系統的に変化させ、Unfolding により Weibull 型 SEU 関数を導出する手法を提案し、本手法の有効性を単色中性子試験結果により検証した。
- (4) 単色中性子試験による Weibull 型 SEU 関数と実環境での SER 測定との関係を明確化し、シミュレーションを統合した宇宙線中性子ソフトエラー評価システム SECIS を提案した。
- (5) 0.18 μm プロセス 4 Mbit 低電力 SRAM の実環境における SER 測定を行った。その結果は単色中性子による加速器試験結果からの予測値と 35%以内、シミュレーション値とは 20%以内で一致した。これにより、SECIS の妥当性を検証した。

以上、本論文は加速器試験を通じて、任意の中性子環境下における半導体デバイスの Weibull 型応答関数 (SEU 関数) を得ることにより、実環境における SER 測定を実施することなく迅速に実使用環境での SER 予測が可能であることを示したもので、今後の半導体デバイスの効率的な技術開発、性能向上に寄与することが期待される。

以上

論文審査結果の要旨

半導体デバイスの微細化・高集積化に伴い、宇宙線中性子によるソフトエラー現象が顕在化し早急な対策が必要とされているが、その機構は解明されておらず評価手法も確立されていない。本論文は、加速器中性子を用いた加速試験とソフトエラーシミュレータを用いることによって実環境下における半導体デバイスのソフトエラー評価を可能としたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、宇宙線中性子ソフトエラー評価体系の構築に必要な要素を明らかにし、SECIS と呼ぶ評価体系を提案している。それは、1)中性子ソフトエラーシミュレーターCORIMS、2)加速器によるソフトエラーの加速器試験、3)実環境におけるフィールド試験、など6要素から構成される。

第3章では、単色及び準単色の中性子ビームを用いた実験とその結果について述べている。数 MeV 領域における実験を行い、最新デバイスではソフトエラーのしきい値が 2MeV 程度まで低下していることを見出した。更にソフトエラー発生確率の中性子エネルギー依存性が Weibull 型関数でよく近似できることを示した。これらはソフトエラー評価の基礎となる重要な知見である。

第4章では、連続スペクトルを持つ中性子による照射試験を行い、その結果が単色及び準単色中性子を用いた試験で求めた Weibull 型関数で矛盾無く説明できることを明らかにしている。また、スペクトル形状をポリエチレンフィルターによって変化させ、それぞれのスペクトルに対するソフトエラー発生確率から半導体デバイスの Weibull 関数型の応答関数を導出する方法を提案し、その結果が単色・準単色中性子による結果とよく整合することを示している。

第5章では、フィールド試験と宇宙線中性子スペクトルの測定結果を示し、実環境におけるソフトエラー発生確率が、中性子スペクトル及び3章、4章で求めた Weibull 型応答関数とから予測される値と 20-30%程度で一致することを示した。これは、本論文における試験とシミュレーションの妥当性を示すと共に、実環境でのソフトエラー率が加速器を用いた試験により迅速に予測できることを明らかにしたもので、重要な知見である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、加速器を用いた加速試験により実環境におけるソフトエラー率を予測する手法を提示したもので、量子エネルギー工学の発展に寄与することが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。